

Verfahren zur Materialbearbeitung mit Laserimpulsen großer spektraler Bandbreite und Vorrichtung zur Durchführung des Verfahrens

Die Erfindung betrifft ein Verfahren zur Materialbearbeitung mit Laserimpulsen großer spektraler Bandbreite, insbesondere mit Femtosekunden- und Pikosekundenimpulsen sowie eine Vorrichtung zur Durchführung des Verfahrens.

Es ist eine Vielzahl von Verfahren bekannt, welche die Wechselwirkung elektromagnetischer Strahlung im infraroten, sichtbaren und ultravioletten Spektralbereich mit Materie zum Schmelzen, Verdampfen, Abtragen (Ablation) von Werkstoff US 4,494,226, zur Induzierung von Phasenübergängen US 6,329,270 oder zur Änderung anderer physikalischer oder chemischer Materialeigenschaften nutzen.

Wird das Wechselwirkungsgebiet von Laserlicht und Werkstück, beispielsweise durch optische Masken oder sukzessive Verschiebung des Laserfokus, auf der Oberfläche des Werkstücks räumlich geformt, so gelingt es, bei der Bearbeitung linien- und flächenhafte Strukturen zu erzeugen; und auch dreidimensionale Strukturen können durch schichtweise Abtragung sowie in transparenten Medien auch durch die Positionierung des Laserfokus in der Tiefe des Materials erzielt werden (DE 100 06 081 A1).

Für viele dieser Verfahren bedarf es hoher Leistungsdichten, die insbesondere durch "Anwendung gepulster Laserstrahlungsquellen erreicht werden können. Bei der Verwendung von Laserimpulsen kurzer Dauer (einige Nanosekunden) wird eine besonders effiziente Bearbeitung erzielt (US 6,281,471). Störende, durch thermische Effekte verursachte Veränderungen des Werkstücks außerhalb der Wechselwirkungszone können bei noch kürzerer Impulsdauer weiter verringert werden (US 6,150,630). Dadurch ist es möglich, beispielsweise mittels Ablation, sehr feine Strukturen zu erzeugen, bei denen die Größe der Materialgebiete, in denen eine Wechselwirkung mit der Strahlung erfolgt, und jene, die keine wesentliche Veränderung gegenüber ihrem Ausgangszustand erfahren, nur durch die Größe des Laserfokus gegeben ist. Die theoretische Grenze für die minimalen Strukturgrößen ist dann durch die Beugungsbegrenzung und somit letztlich durch die Wellenlänge der verwendeten Laserstrahlung bestimmt. Insbesondere die Verwendung von Laserimpulsen mit Impulsdauern im Bereich von etwa 20 fs bis 1000 ps ermöglicht die direkte Mikro-Materialbearbeitung (F. Korte et. al.: "Sub-diffraction limited structuring of solid targets with femtosecond laser pulses", Optics Express 7, 2000, 41), die neben technischen Anwendungen

auch medizinische Anwendungen, insbesondere in der Mikrochirurgie, einschließt. Darüber hinaus finden Vorrichtungen zur Erzeugung spektral breitbandiger Laserimpulse als Ultrakurzpuls laser breite Anwendung in der Forschung.

In zwei experimentelle Arbeiten von Stoian et al. (R. Stoian et al.: "Laser ablation of dielectrics with temporally shaped femtosecond pulses", Appl. Phys. Lett. 80, 2002, 353; R. Stoian et al.: "Ultrafast laser material processing using dynamic temporal pulse shaping", RIKEN Review 50, 2003) wurde offenbart, wie mittels zeitlich geformter Laserimpulse der Strukturierungsprozess bei der Laserablation hinsichtlich der Reduktion des Restschadens optimiert werden kann. Zu diesem Zweck wurden mittels Phasenmodulation verschiedene Impulszüge erzeugt und die Vorteilhaftigkeit ihrer Verwendung gegenüber ungeformten Laserimpulsen des verwendeten Lasersystems beim ablativen Laserbohren ausgewählter Materialien unter Vakuumbedingungen experimentell nachgewiesen. Dazu wurden zum Vergleich ungeformte und geformte Laserimpulse jeweils auf die Oberfläche von a-SiO₂ und Al₂O₃ gerichtet und das Bearbeitungsergebnis anschließend mit Hilfe eines Lichtmikroskops visuell analysiert.

Bei der Lasermaterialbearbeitung von Verbundwerkstoffen besteht die Möglichkeit, das Amplitudenspektrum der verwendeten Laserimpulse so zu wählen, dass eine materialselektive Bearbeitung möglich ist. Die Auswahl eines geeigneten Lasers unter dem Gesichtspunkt einer Anpassung der Laserwellenlänge an das zu bearbeitende Material ist eine bekannte Methode (beispielsweise US 5,948,214, US 5,948,214, US 4,399,345 und US 5,569,398). Allerdings können sich die physikalisch-technischen Eigenschaften des Bearbeitungsobjektes im Bearbeitungsvorgang, beispielsweise durch Materialerwärmung, ändern. Insbesondere Veränderungen der Absorptionscharakteristik von Verbundkomponenten schränken dabei die Materialselektivität im Bearbeitungsvorgang ein (US 6,281,471), da eine adäquate Veränderung der Laserwellenlänge bei den zur Materialbearbeitung verwendeten Lasern kaum möglich ist.

Es war deshalb ein Verfahren zu schaffen, mit dem möglichst aufwandgering, flexibel und universell anwendbar Bearbeitungswirkungen ermöglicht werden, die jeweils spezifisch hinsichtlich Bearbeitungsaufgabe und Prozessverlauf festgelegt und angepasst werden können.

Erfnungsgemäß werden für den Materialbearbeitungsprozess bzw. währenddessen ein oder mehrere spektrale Parameter der Laserimpulse, d. h. die spektrale Amplitude und/oder die spektrale Phase und/oder die spektrale Polarisation, gezielt verändert, um damit definierte bearbeitungsspezifische Effekte, wie beispielsweise die Erhöhung der Bearbeitungsgeschwindigkeit, die Verbesserung der Materialselektivität, oder die Verbesserung der Oberflächenstrukturierung, zu bewirken. Dabei ist es vorteilhaft, wenn zumindest ein spektraler Parameter in Abhängigkeit einer Messgröße aus dem Bearbeitungsprozess, vorzugsweise in einem Regelkreis, verändert wird. In den Unteransprüchen sind hierzu nähere Spezifikationen beispielhaft angeführt.

Auf diese Weise ist es einerseits möglich, die für den vorgesehenen Bearbeitungsvorgang und den beabsichtigten Effekt dieser Materialbearbeitung bestmögliche Einstellung der spektralen Laserimpuls-Parameter (beispielsweise auf Grund von Testergebnissen oder sonstigen Erfahrungen oder Berechnungen) vorzunehmen. Darüber hinaus können andererseits die besagten spektralen Laserimpuls-Parameter nicht nur definiert vorgewählt, sondern für den Materialbearbeitungsprozess und/oder während dessen Durchführung in Abhängigkeit einer Regelgröße unmittelbar aus dem Bearbeitungsvorgang in Hinsicht auf die beabsichtigte Bearbeitungswirkung verändert und angepasst werden. Insofern kann auch auf die Veränderung physikalisch-technischer Eigenschaften des Bearbeitungsobjektes und der Prozessbedingungen im Bearbeitungsvorgang reagiert werden, um die bezweckte Bearbeitungswirkung zu verbessern oder zumindest nicht zu beeinträchtigen. Beispielsweise

~~kann im Fall von Materialerwärmungen, welche bei der Bearbeitung von Verbundwerkstoffen im Allgemeinen nicht ohne Auswirkung auf die Materialselektivität bleibt, die spektrale Amplitude der Laserimpulse in Abhängigkeit der Wechselwirkung der Laserimpulse mit den Verbundwerkstoffen als Messgröße dynamisch verändert werden. Diese Veränderungen können sowohl kontinuierlich oder in Intervallen unmittelbar im Bearbeitungsvorgang durchgeführt werden (Regelbetrieb), als auch mit Unterbrechung des Bearbeitungsvorganges und Neueinstellung der spektralen Parameter für dessen Weiterführung erfolgen.~~

Eigene Untersuchungen zur Mikrostrukturierung von optisch anisotropen Werkstoffen zeigen, dass durch eine gezielte Veränderung der Frequenzkomponenten eines spektral breitbandigen Laserimpulses der Wechselwirkungsprozess zwischen dem Laserimpuls und dem Bearbeitungsobjekt gesteuert werden kann. Insbesondere ermöglicht die gleichzeitige Regelung der spektralen Polarisation und der spektralen Phase bei der Bearbeitung anisotroper Werkstoffe die Kontrolle jenes Strukturierungsprozesses, der für die Erzeugung

von anisotropen Wellenleiterstrukturen genutzt wird, zumal bekannte experimentelle Ergebnisse (F. Korte et. al.: "Sub-diffraction limited structuring of solid targets with femtosecond laser pulses", Optics Express 7, 2000, 41) belegen, dass sogar bei der Laserbearbeitung optisch isotroper Materialien nicht nur eine lokale Brechzahländerung erfolgt, sondern in der Regel auch eine lokale Anisotropie induziert wird.

Möglichkeiten, die spektralen Parameter von spektral breitbandigen Laserimpulsen an sich zu verändern, sind hinreichend bekannt (US 4,655,547 oder Brixner and Gerber: Optics Letters 26, 2001, 557). Insbesondere Modulatoren auf der Grundlage mikro-elektromechanischer Systeme (MEMS) erscheinen für eine zukünftige industriellen Applikationen als aussichtsreich (Hacker et al.: „Micromirror SLM for femtosecond pulse shaping in the ultraviolet“, Appl. Phys. B 76, 2003, 711).

Die Erfindung soll nachstehend anhand zweier in der Zeichnung dargestellter Ausführungsbeispiele näher erläutert werden.

Es zeigen:

Fig. 1: Prinzipaufbau einer Vorrichtung zur Materialbearbeitung unter Formung der spektralen Laserimpuls-Parameter

Fig. 2: Prinzipaufbau einer Vorrichtung zur laserbasierten Unterbrechung elektrischer Leiterbahnen auf einem Mikrochip unter Veränderung der spektralen Amplitude der Laserimpulse.

In Fig. 1 ist der Prinzipaufbau einer Vorrichtung zur Materialbearbeitung unter Formung der spektralen Laserimpuls-Parameter dargestellt. Ein Kurzpuls-laser 1 als Quelle breitbandiger Laserimpulse 1 steht über einen Impulsformer 2 zur Formung der spektralen Parameter der Laserimpulse mit einer Bearbeitungseinheit 3 zur Materialbearbeitung eines nicht dargestellten Bearbeitungsobjektes in Verbindung. Die Impulse des Kurzpuls-lasers 1 werden somit in ihrer spektralen Amplitude und/oder der spektralen Phase und/oder der spektralen Polarisation geformt und rufen in der Bearbeitungseinheit 3 bei ihrem Auftreffen auf das Bearbeitungsobjekt eine physikalisch-technische Wechselwirkung mit dessen Material hervor. Dabei können die geformten Laserimpulse (wie gestrichelt dargestellt) ggf. auch über einen optischen Verstärker 4 zur Bearbeitungseinheit 3 gelangen.

Mit Veränderung eines oder mehrerer spektralen Parameter der Laserimpulse durch den Impulsformer 2 kann die Wechselwirkung der Laserimpulse mit dem Material des Bearbeitungsobjektes zum Erreichen definierter bearbeitungsspezifischer Effekte, beispielsweise in Hinsicht auf Bearbeitungsgeschwindigkeit, Materialselektivität oder Oberflächenstrukturierung, für den Bearbeitungsprozess oder auch im Verlauf desselben beeinflusst werden.

Dabei ist es vorteilhaft, wenn die spektrale Parameteränderung in Abhängigkeit einer als Regelgröße dienenden Messgröße der Materialbearbeitung verändert wird. Zu diesem Zweck ist an die Bearbeitungseinheit 3 mit dem zu bearbeitenden Objekt vorzugsweise eine Messeinrichtung 5 gekoppelt, die über eine Steuereinheit 6 mit dem Impulsformer 2 in Verbindung steht. Die Messeinrichtung 5 misst beispielsweise die Ablationsrate, die Oberflächenrauhigkeit oder die Material- bzw. Umgebungstemperatur des Bearbeitungsobjektes und liefert über die Steuereinheit 6 eine messgrößenabhängige Regelgröße zur Veränderung der spektralen Amplitude und/oder der spektralen Phase und/oder der spektralen Polarisation der Impulse des Kurzpulsasers 1.

In Fig. 2 ist der Prinzipaufbau einer speziellen Vorrichtung zur laserbasierten Unterbrechung elektrischer Leiterbahnen auf einem Mikrochip (link blow) dargestellt. Eine solche Aufgabe zur Materialbearbeitung besteht insbesondere bei Konditionierung von Speicherchips. Dabei kann das erfindungsgemäße Verfahren vorteilhaft eingesetzt werden, um die erzielte Materialselektivität zur Vermeidung von Schäden am Substrat des Mikrochips zu nutzen, welche sonst durch Ungenauigkeit bei der räumlichen Überlagerung des Laserlichts mit den zu bearbeitenden Leiterbahnen entstehen (vgl. auch US 6,281,471). Da es bei der Materialbearbeitung auch zur Temperaturänderung des Bearbeitungsobjektes kommt, wodurch sich die Absorptionsspektren der einzelnen Materialkomponenten verschieben, ist die Wirkung des erfindungsgemäßen Verfahrens besonders vorteilhaft, weil ansonsten mit Verschiebung der besagten Absorptionsspektren der Verbundmaterialien eine Beeinträchtigung der Materialselektivität gegeben wäre. Dies könnte ebenfalls Bearbeitungsfehler und Schäden am Bearbeitungsobjekt zur Folge haben.

Die Vorrichtung enthält einen Femtosekundenlaser 7, der über eine Laserverstärkerstufe 8 mit einem amplitudenmodulierenden Pulsformer 9 in Verbindung steht, dessen Steuereingang zur Amplitudenmodulierung an den Ausgang einer Steuereinheit 10 angeschlossen ist. Die Laserimpulse des Femtosekundenlasers 7 gelangen nach Verstärkung und nach Modulierung ihrer spektralen Amplitude auf ein achromatisches Objektiv 11,

welches den Laserstrahl auf einen Wechselwirkungsbereich 12 mit einem Bearbeitungsobjekt 13 lenkt. Das Bearbeitungsobjekt 13 ist auf einem Koordinatentisch 14 angeordnet, der eine Positionierung des Bearbeitungsobjektes 13 in drei Raumrichtungen erlaubt. Der amplitudenmodulierende Pulsformer 9 kann beispielsweise durch eine optische Anordnung gemäß US 4,655,547 realisiert werden, welche eine räumliche Separation der spektralen Komponenten des Laserstrahls mittels eines Beugungsgitters und eine nachfolgende Abbildung des Spektrums in eine Fourierebene mittels einer Linse beinhaltet. Eine in dieser Fourierebene angeordnete polarisationsrotierende, streifenförmige Flüssigkristallmatrix (twisted nematic liquid crystal matrix) dient als räumlicher Lichtmodulator und bewirkt eine Veränderung des Polarisationszustandes der die einzelnen Streifen durchsetzenden spektralen Komponenten. Ein nachfolgender Polarisator (Analysator) dient in der besagten Patentschrift zur Übertragung der auf diese Weise erzielten Änderung des Polarisationszustands der einzelnen spektralen Komponenten in die gewünschte spektrale Amplitudenmodulation. Eine weitere Linse und ein weiteres dispersives Element mit den gleichen Parametern der entsprechenden Eingangskomponenten bewirken eine Rücktransformation des räumlich separierten Spektrums in den Laserstrahl (Kollimation).

Bei geeigneter Wahl der Parameter für die Impulsformung lässt sich eine Materialselektivität durch die Anpassung der spektralen Amplitude der Laserimpulse an das Absorptionspektrum der zu bearbeitenden Materialkomponente erzielen, um benachbarte Zonen anderen Materials bei der Laserbearbeitung nicht zu schädigen. Darüber hinaus kann auch auf Temperaturveränderungen reagiert werden, die infolge der Materialbearbeitung entstehen und die Absorptionsspektren der Verbundmaterialien verschieben. In diesem Fall könnte (vgl. Fig. 1) am Bearbeitungsobjekt 13 ein Messfühler zur Temperatur erfassung angeordnet sein (aus Übersichtsgründen nicht in Fig. 2 dargestellt), der mit der Steuereinheit 10 in Verbindung steht. In diesem Fall würde der Impulsformer mit einer temperaturabhängigen Steuerung während der Lasermaterialbearbeitung eine dynamische Anpassung der spektralen Amplitude der Laserimpulse an die Absorptionscharakteristik des zu ablatierenden Materials erlauben, so dass Temperaturveränderungen im Bearbeitungsprozess nicht die Materialselektivität beeinträchtigen.

Die Realisierung der Erfindung ist nicht an die angegebenen Ausführungsbeispiele gebunden, fachmännische Weiterentwicklungen verlassen nicht den durch die Ansprüche definierten Schutzbereich.

Aufstellung der verwendeten Bezugszeichen

1	-	Kurzpulsar
2	-	Impulsformer
3	-	Bearbeitungseinheit
4	-	optischer Verstärker
5	-	Messeinrichtung
6, 10	-	Steuereinheit
7	-	Femtosekundenlaser
8	-	Laserverstärkerstufe
9	-	amplitudenmodulierender Pulsformer
11	-	achromatisches Objektiv
12	-	Wechselwirkungsbereich
13	-	Bearbeitungsobjekt
14	-	Koordinatentisch

Patentansprüche

1. Verfahren zur Materialbearbeitung mit Laserimpulsen großer spektraler Bandbreite, bei welchem die Laserimpulse auf ein Bearbeitungsobjekt treffen oder in ein Bearbeitungsobjekt eindringen und auf oder in dem Bearbeitungsobjekt eine physikalische oder chemische Veränderung des Materials hervorrufen, dadurch gekennzeichnet, dass zum Erreichen definierter bearbeitungsspezifischer Effekte, wie beispielsweise die Erhöhung der Bearbeitungsgeschwindigkeit, die Verbesserung der Materialselektivität, die Verbesserung der Oberflächenstrukturierung, oder das Erzielen eines optischen Durchbruchs ein oder mehrere spektrale Parameter der Laserimpulse vor und/oder während des Bearbeitungsprozesses gezielt verändert werden.
2. Verfahren gemäß Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass als spektraler Parameter die spektrale Amplitude der Laserimpulse verändert wird.
3. Verfahren gemäß Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass als spektraler Parameter die spektrale Phase der Laserimpulse verändert wird.
4. Verfahren gemäß Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass als spektraler Parameter die spektrale Polarisation der Laserimpulse verändert wird.
5. Verfahren gemäß Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass zumindest ein spektraler Parameter in Abhängigkeit einer Messgröße aus dem Bearbeitungsprozess vorzugsweise dynamisch verändert wird.
6. Verfahren gemäß Anspruch 5, dadurch gekennzeichnet, dass als Messgröße die Abtragsrate der Materialbearbeitung dient.
7. Verfahren gemäß Anspruch 5, dadurch gekennzeichnet, dass als Messgröße die Oberflächenrauhigkeit dient.

8. Verfahren gemäß Anspruch 5, dadurch gekennzeichnet, dass insbesondere bei der Erzeugung oder Bearbeitung eines optischen Wellenleiters die Transmission des Bearbeitungsobjektes als Messgröße verwendet wird.
9. Verfahren gemäß Anspruch 5, dadurch gekennzeichnet, dass insbesondere bei der Erzeugung oder Bearbeitung eines optischen Wellenleiters die Reflexion elektromagnetischer Wellen als Messgröße verwendet wird.
10. Verfahren gemäß Anspruch 5, dadurch gekennzeichnet, dass der vom Bearbeitungsbereich reflektierte Anteil des Laserlichts als Messgröße dient.
11. Verfahren gemäß Anspruch 5, dadurch gekennzeichnet, dass insbesondere bei der Herstellung oder Bearbeitung eines mikromechanischen Bauelements mindestens eine seiner Resonanzfrequenzen als Messgröße herangezogen wird.
12. Verfahren gemäß Anspruch 5, dadurch gekennzeichnet, dass insbesondere bei der Herstellung oder Bearbeitung eines mikromechanischen Bauelements eine Resonanzamplitude bei einer definierten Schwingungsfrequenz als Messgröße dient.
13. Verfahren gemäß Anspruch 5, dadurch gekennzeichnet, dass die Hydrophobizität bzw. die Hydrophilizität der Bearbeitungsoberfläche als Messgröße ausgewertet wird.
14. Verfahren gemäß Anspruch 5, dadurch gekennzeichnet, dass die Anisotropie des bearbeiteten Materials als Messgröße ausgewertet wird.
15. Verfahren gemäß Anspruch 5, dadurch gekennzeichnet, dass bei der Bearbeitung von Verbundwerkstoffen die Materialselektivität die Wechselwirkung der Laserimpulse mit den Verbundwerkstoffen als Messgröße verwendet wird.
16. Verfahren gemäß Anspruch 5, dadurch gekennzeichnet, dass bei der Bearbeitung von mikroelektronischen Bauelementen mindestens eine ihrer elektrischen Eigenschaften, wie Leitfähigkeit oder Kapazität, als Messgröße verwendet wird.

17. Verfahren gemäß Anspruch 5, dadurch gekennzeichnet, dass bei der Bearbeitung menschlichen Gewebes, insbesondere menschlichen Augengewebes, mindestens ein Plasmaparameter, wie der Energie-Schwellwert für den optischen Durchbruch, das Streulicht oder das Plasmaspektrum, als Messgröße verwendet wird.
18. Verfahren gemäß Anspruch 5, dadurch gekennzeichnet, dass bei der Zwei-Photonen-Polymerisation photosensitiver Materialien, insbesondere eines flüssigen Resins, die Quanteneffizienz des Polymerisationsprozesses, optische, oder mechanische Eigenschaften des polymerisierten Materials als Messgröße verwendet werden.
19. Verfahren nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass die spektralen Parameter der Laserimpulse zunächst in ihrer Wirkung auf den vorgesehenen Bearbeitungsvorgang getestet werden und dass anschließend die in Hinsicht auf die abgezielte Bearbeitungswirkung ausgewählten spektralen Parameter als Ausgangsgrößen für den Materialbearbeitungsprozess eingestellt werden.
20. Verfahren nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass die aus Erfahrungen oder Berechnungen bekannten spektralen Parameter der Laserimpulse als Ausgangsgrößen für den Bearbeitungsprozess eingestellt werden.
21. Vorrichtung zur Durchführung des Verfahrens nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass ein Laser (1) zur Erzeugung von Laserimpulsen großer spektraler Bandbreite über einen Impulsformer (2) zur Einstellung bzw. Veränderung der spektralen Amplitude und/oder der spektralen Phase und/oder der spektralen Polarisation der Laserimpulse mit einer Bearbeitungseinheit (3, 11) für die Laserimpulsbehandlung eines Bearbeitungsobjektes (13) in Verbindung steht.
22. Vorrichtung nach Anspruch 21, dadurch gekennzeichnet, dass dem Impulsformer (2) mindestens eine Verstärkerstufe (4, 8) zur Verstärkung der Laserimpulse vor- und/oder nachgeschaltet ist.
23. Vorrichtung nach Anspruch 21, dadurch gekennzeichnet, dass eine Messeinrichtung (5) zur Überwachung des Bearbeitungsprozesses vorgesehen ist, welche über eine Steuereinheit (6, 10) mit dem Impulsformer (2) in Verbindung steht.

24. Vorrichtung nach Anspruch 23, dadurch gekennzeichnet, dass die Messeinrichtung (5) mindestens eine Messeinrichtung zur Messung der optischen Materialeigenschaften, wie Streuung, Brechzahl oder Plasma-Emissionsspektrum hat.
25. Vorrichtung nach Anspruch 23, dadurch gekennzeichnet, dass die Messeinrichtung (5) mindestens einen Messwertaufnehmer zur Messung der Temperatur der Materialbearbeitung besitzt.
26. Vorrichtung nach Anspruch 23, dadurch gekennzeichnet, dass die Messeinrichtung (5) mindestens einen Messwertaufnehmer zur Messung der Oberflächenrauhigkeit des Bearbeitungsobjektes (14) besitzt.
27. Vorrichtung nach Anspruch 23, dadurch gekennzeichnet, dass die Messeinrichtung (5) mindestens einen optischen Sensor aufweist.
28. Vorrichtung nach Anspruch 21, dadurch gekennzeichnet, dass sie zur Bearbeitung menschlichen Augengewebes geeignet ist.
29. Vorrichtung nach Anspruch 21, dadurch gekennzeichnet, dass sie einen spektralen Phasenmodulator beinhaltet, der auf der Verwendung eines mikro-elektro-mechanischen Systems (MEMS) basiert.

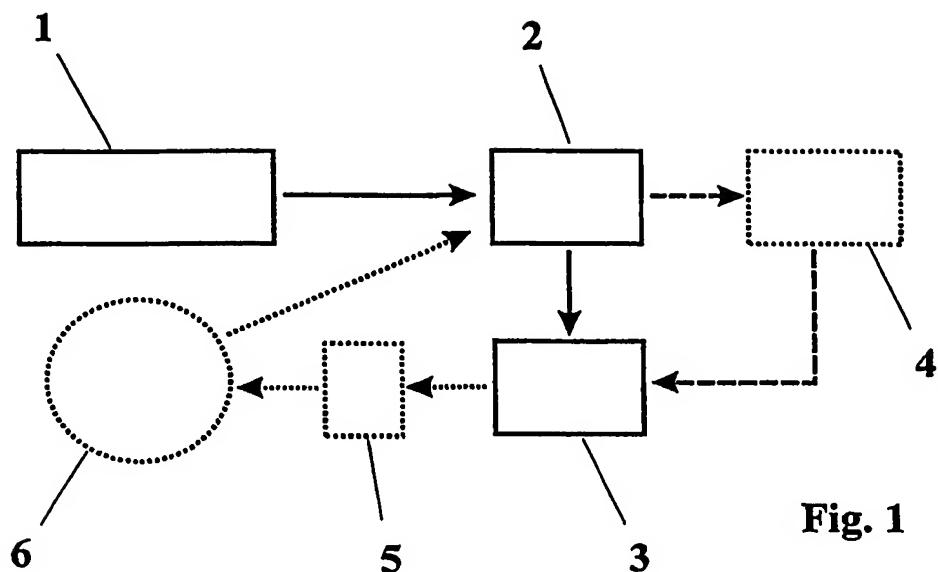


Fig. 1

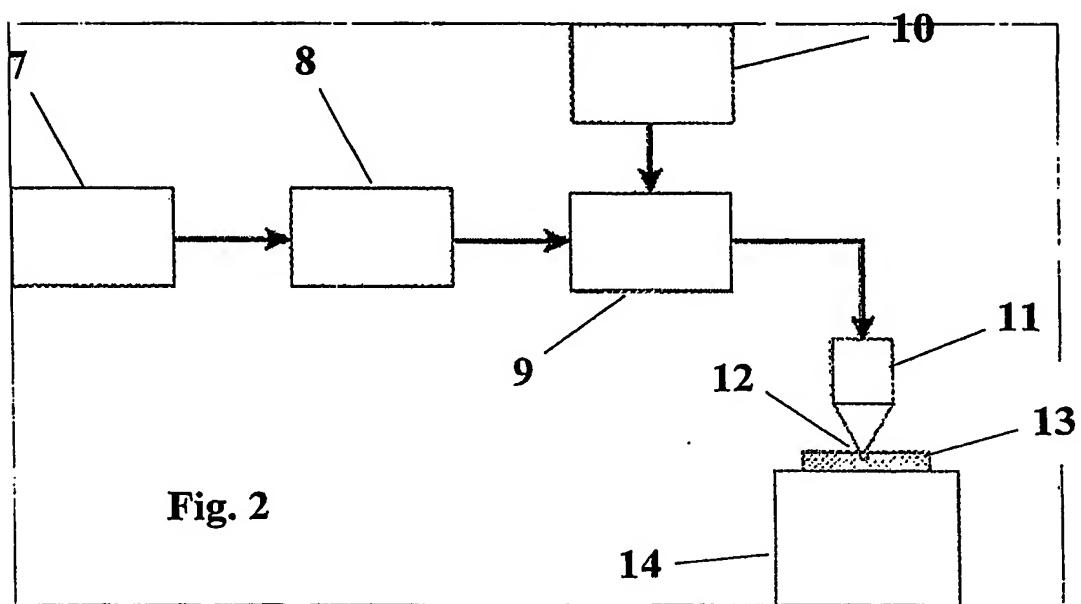


Fig. 2

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER
IPC 7 B23K26/06

According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC

B. FIELDS SEARCHEDMinimum documentation searched (classification system followed by classification symbols)
IPC 7 B23K H01S

Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched

Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practical, search terms used)

EPO-Internal, WPI Data, PAJ**C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT**

Category *	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
X	WO 02/28305 A (KRAUSZ FERENC ; STINGL ANDREAS (AT); FEMTOLASERS PRODUKTIONS GMBH (AT)) 11 April 2002 (2002-04-11)	1,2,4, 21,22,29
A	page 2, last paragraph - page 4, paragraph 1 page 15, paragraph 4; figure 1 page 12, last paragraph - page 132, paragraph 1; figures 1-5 -----	28
X	US 4 655 547 A (HERITAGE JONATHAN P ET AL) 7 April 1987 (1987-04-07) cited in the application column 1, line 12 - line 17 column 4, line 50 - line 68 column 6, line 9 - line 42 -----	1-3,21
A	----- -/-	29

 Further documents are listed in the continuation of box C. Patent family members are listed in annex.

* Special categories of cited documents :

- "A" document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance
- "E" earlier document but published on or after the International filing date
- "L" document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified)
- "O" document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means
- "P" document published prior to the International filing date but later than the priority date claimed

- "T" later document published after the International filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention
- "X" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone
- "Y" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art.
- "&" document member of the same patent family

Date of the actual completion of the International search

18 November 2004

Date of mailing of the International search report

30/11/2004

Name and mailing address of the ISA
European Patent Office, P.B. 5818 Patentlaan 2
NL - 2280 HV Rijswijk
Tel. (+31-70) 340-2040, Tx. 31 651 epo nl,
Fax: (+31-70) 340-3016

Authorized officer

Aran, D

C.(Continuation) DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
X	STOIAN, R. ET AL.: "Ultrafast Laser material processing using dynamic temporal pulse shaping" RIKEN REVIEW, no. 50, January 2003 (2003-01), pages 71-76, XP008038971 cited in the application page 76, column 1, paragraph 1 -----	1,3, 19-21
X	US 6 281 471 B1 (SMART DONALD V) 28 August 2001 (2001-08-28) cited in the application the whole document -----	1,2,21, 22
P,X	DE 102 03 198 A (UNIV SCHILLER JENA) 31 July 2003 (2003-07-31) the whole document -----	1-29
A	HACKER M ET AL: "MICROMIRROR SLM FOR FEMTOSECOND PULSE SHAPING IN THE ULTRAVIOLET" APPLIED PHYSICS. B, LASERS AND OPTICS, SPRINGER, BERLIN,, DE, vol. B76, 2003, pages 711-714, XP008035863 ISSN: 0946-2171 cited in the application the whole document -----	1,4,28, 29
A	BRIXNER T ET AL: "FEMTOSECOND POLARIZATION PULSE SHAPING" OPTICS LETTERS, OPTICAL SOCIETY OF AMERICA, WASHINGTON, US, vol. 26, no. 8, 15 April 2001 (2001-04-15), pages 557-559, XP008035861 ISSN: 0146-9592 cited in the application -----	1,4,21
A	STOIAN R ET AL: "Laser ablation of dielectrics with temporally shaped femtosecond pulses" APPLIED PHYSICS LETTERS, AMERICAN INSTITUTE OF PHYSICS. NEW YORK, US, vol. 80, no. 3, 21 January 2002 (2002-01-21), pages 353-355, XP012031308 ISSN: 0003-6951 cited in the application -----	1-3,19, 21
A	US 6 329 270 B1 (VOUTSAS TOLIS) 11 December 2001 (2001-12-11) cited in the application -----	

-/--

C(Continuation) DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
A	US 6 150 630 A (MYERS BOOTH R ET AL) 21 November 2000 (2000-11-21) cited in the application -----	
A	KORTE F ET AL: "SUB-DIFFRACTION LIMITED STRUCTURING OF SOLID TARGETS WITH FEMTOSECOND LASER PULSES" OPTICS EXPRESS, OPTICAL SOCIETY OF AMERICA, WASHINGTON, DC, US, vol. 7, no. 2, 17 July 2000 (2000-07-17), pages 41-49, XP008035860 ISSN: 1094-4087 cited in the application -----	
A	US 5 569 398 A (SUN YUNLONG ET AL) 29 October 1996 (1996-10-29) cited in the application -----	1,2,21
A	US 4 399 345 A (CLARK TOMMY D ET AL) 16 August 1983 (1983-08-16) cited in the application -----	
A	US 5 948 214 A (BAILEY GEOFFREY H) 7 September 1999 (1999-09-07) cited in the application -----	
A	US 4 494 226 A (HAZEL ROBERT L ET AL) 15 January 1985 (1985-01-15) cited in the application -----	
A	DE 100 06 081 A (HEIDELBERG INSTR MIKROTECHNIK) 23 August 2001 (2001-08-23) cited in the application -----	

Best Available Copy

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

Information on patent family members

International Application No
PCT/EP2004/008090

Patent document cited in search report		Publication date	Patent family member(s)		Publication date
WO 0228305	A	11-04-2002	AT	411719 B	26-04-2004
			WO	0228305 A1	11-04-2002
			AT	16672000 A	15-09-2003
			AU	8942401 A	15-04-2002
			DE	50101940 D1	13-05-2004
			EP	1322248 A1	02-07-2003
			US	2004102767 A1	27-05-2004
US 4655547	A	07-04-1987	NONE		
US 6281471	B1	28-08-2001	DE	60009348 D1	29-04-2004
			DE	60009348 T2	19-08-2004
			EP	1244534 A1	02-10-2002
			JP	2003518440 T	10-06-2003
			TW	478025 B	01-03-2002
			WO	0147659 A1	05-07-2001
			US	2002125228 A1	12-09-2002
			US	6340806 B1	22-01-2002
			US	2004134896 A1	15-07-2004
			US	2004134894 A1	15-07-2004
			US	2004188399 A1	30-09-2004
			US	2002023901 A1	28-02-2002
DE 10203198	A	31-07-2003	DE	10203198 A1	31-07-2003
US 6329270	B1	11-12-2001	US	5959314 A	28-09-1999
			US	5827773 A	27-10-1998
			JP	2000232065 A	22-08-2000
			JP	2000068203 A	03-03-2000
			US	6169013 B1	02-01-2001
			JP	3558200 B2	25-08-2004
			JP	10291897 A	04-11-1998
US 6150630	A	21-11-2000	US	6621040 B1	16-09-2003
			US	5720894 A	24-02-1998
			AU	7499398 A	10-01-2000
			EP	1011911 A1	28-06-2000
			JP	2002511801 T	16-04-2002
			WO	9967048 A1	29-12-1999
			US	6303901 B1	16-10-2001
			US	2002001321 A1	03-01-2002
			AU	1823397 A	20-08-1997
			CA	2215060 A1	31-07-1997
			EP	0821570 A1	04-02-1998
			JP	11504843 T	11-05-1999
			WO	9726830 A1	31-07-1997
US 5569398	A	29-10-1996	US	5265114 A	23-11-1993
			DE	69507713 D1	18-03-1999
			DE	69507713 T2	02-09-1999
			EP	0793557 A1	10-09-1997
			JP	3423000 B2	07-07-2003
			JP	2001520583 T	30-10-2001
			WO	9615870 A1	30-05-1996
			US	5685995 A	11-11-1997
			US	5808272 A	15-09-1998
			GB	2283859 A , B	17-05-1995
			JP	2625261 B2	02-07-1997

Best Available Copy

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

Information on patent family members

International Application No

PCT/EP2004/008090

Patent document cited in search report	Publication date		Patent family member(s)		Publication date
US 5569398	A		JP 7506221 T KR 231811 B1 SG 81853 A1 WO 9406182 A1 US 5473624 A		06-07-1995 01-12-1999 24-07-2001 17-03-1994 05-12-1995
US 4399345	A	16-08-1983	GB 2103884 A ,B IE 53635 B1 JP 58000118 A		23-02-1983 04-01-1989 05-01-1983
US 5948214	A	07-09-1999	DE 69607598 D1 DE 69607598 T2 EP 0806982 A1 WO 9623578 A1 JP 10513108 T ZA 9600715 A		11-05-2000 04-01-2001 19-11-1997 08-08-1996 15-12-1998 19-08-1996
US 4494226	A	15-01-1985	EP 0077642 A2 JP 58501745 T WO 8301533 A1		27-04-1983 13-10-1983 28-04-1983
DE 10006081	A	23-08-2001	DE 10006081 A1		23-08-2001

Best Available Copy

A. KLASSEFIZIERUNG DES ANMELDUNGSGEGENSTANDES
IPK 7 B23K26/06

Nach der Internationalen Patentklassifikation (IPK) oder nach der nationalen Klassifikation und der IPK

B. RECHERCHIERTE GEBIETE

Recherchierte Mindestprästoff (Klassifikationssystem und Klassifikationssymbole)
IPK 7 B23K H01S

Recherchierte aber nicht zum Mindestprästoff gehörende Veröffentlichungen, soweit diese unter die recherchierten Gebiete fallen

Während der Internationalen Recherche konsultierte elektronische Datenbank (Name der Datenbank und evtl. verwendete Suchbegriffe)

EPO-Internal, WPI Data, PAJ

C. ALS WESENTLICH ANGESEHENE UNTERLAGEN

Kategorie*	Bezeichnung der Veröffentlichung, soweit erforderlich unter Angabe der in Betracht kommenden Teile	Betr. Anspruch Nr.
X A	WO 02/28305 A (KRAUSZ FERENC ; STINGL ANDREAS (AT); FEMTOLASERS PRODUKTIONS GMBH (AT)) 11. April 2002 (2002-04-11) Seite 2, letzter Absatz - Seite 4, Absatz 1 Seite 15, Absatz 4; Abbildung 1 Seite 12, letzter Absatz - Seite 132, Absatz 1; Abbildungen 1-5 -----	1,2,4, 21,22,29 28
X A	US 4 655 547 A (HERITAGE JONATHAN P ET AL) 7. April 1987 (1987-04-07) in der Anmeldung erwähnt Spalte 1, Zeile 12 - Zeile 17 Spalte 4, Zeile 50 - Zeile 68 Spalte 6, Zeile 9 - Zeile 42 -----	1-3,21 29
		-/-

 Weitere Veröffentlichungen sind der Fortsetzung von Feld C zu entnehmen Siehe Anhang Patentfamilie

- * Besondere Kategorien von angegebenen Veröffentlichungen :
- *'A" Veröffentlichung, die den allgemeinen Stand der Technik definiert, aber nicht als besonders bedeutsam anzusehen ist
- *'E" älteres Dokument, das jedoch erst am oder nach dem internationalen Anmeldedatum veröffentlicht worden ist
- *'L" Veröffentlichung, die geeignet ist, einen Prioritätsanspruch zweifelhaft erscheinen zu lassen, oder durch die das Veröffentlichungsdatum einer anderen im Recherchenbericht genannten Veröffentlichung belegt werden soll oder die aus einem anderen besonderen Grund angegeben ist (wie ausgeführt)
- *'O" Veröffentlichung, die sich auf eine mündliche Offenbarung, eine Benutzung, eine Ausstellung oder andere Maßnahmen bezieht
- *'P" Veröffentlichung, die vor dem internationalen Anmeldedatum, aber nach dem beanspruchten Prioritätsdatum veröffentlicht worden ist

- *'T" Spätere Veröffentlichung, die nach dem internationalen Anmeldedatum oder dem Prioritätsdatum veröffentlicht worden ist und mit der Anmeldung nicht kollidiert, sondern nur zum Verständnis des der Erfindung zugrundeliegenden Prinzips oder der ihr zugrundeliegenden Theorie angegeben ist
- *'X" Veröffentlichung von besonderer Bedeutung; die beanspruchte Erfindung kann allein aufgrund dieser Veröffentlichung nicht als neu oder auf erfinderischer Tätigkeit beruhend betrachtet werden
- *'Y" Veröffentlichung von besonderer Bedeutung; die beanspruchte Erfindung kann nicht als auf erfinderischer Tätigkeit beruhend betrachtet werden, wenn die Veröffentlichung mit einer oder mehreren anderen Veröffentlichungen dieser Kategorie in Verbindung gebracht wird und diese Verbindung für einen Fachmann naheliegend ist
- *&" Veröffentlichung, die Mitglied derselben Patentfamilie ist

Datum des Abschlusses der Internationalen Recherche	Absendedatum des Internationalen Recherchenberichts
18. November 2004	30/11/2004

Name und Postanschrift der Internationalen Recherchenbehörde
Europäisches Patentamt, P.B. 5818 Patentlaan 2
NL - 2280 HV Rijswijk
Tel. (+31-70) 340-2040, Tx. 31 651 epo nl,
Fax: (+31-70) 340-3016

Bevollmächtigter Bediensteter

Aran, D

INTERNATIONALER RECHERCHENBERICHT

Internationales Aktenzeichen
PCT/EP2004/008090

C.(Fortsetzung) ALS WESENTLICH ANGESEHENE UNTERLAGEN

Kategorie*	Bezeichnung der Veröffentlichung, soweit erforderlich unter Angabe der in Betracht kommenden Teile	Betr. Anspruch Nr.
X	STOIAN, R. ET AL.: "Ultrafast Laser material processing using dynamic temporal pulse shaping" RIKEN REVIEW, Nr. 50, Januar 2003 (2003-01), Seiten 71-76, XP008038971 in der Anmeldung erwähnt Seite 76, Spalte 1, Absatz 1 -----	1,3, 19-21
X	US 6 281 471 B1 (SMART DONALD V) 28. August 2001 (2001-08-28) in der Anmeldung erwähnt das ganze Dokument -----	1,2,21, 22
P,X	DE 102 03 198 A (UNIV SCHILLER JENA) 31. Juli 2003 (2003-07-31) das ganze Dokument -----	1-29
A	HACKER M ET AL: "MICROMIRROR SLM FOR FEMTOSECOND PULSE SHAPING IN THE ULTRAVIOLET" APPLIED PHYSICS. B, LASERS AND OPTICS, SPRINGER, BERLIN,, DE, Bd. B76, 2003, Seiten 711-714, XP008035863 ISSN: 0946-2171 in der Anmeldung erwähnt das ganze Dokument -----	1,4,28, 29
A	BRIXNER T ET AL: "FEMTOSECOND POLARIZATION PULSE SHAPING" OPTICS LETTERS, OPTICAL SOCIETY OF AMERICA, WASHINGTON, US, Bd. 26, Nr. 8, 15. April 2001 (2001-04-15), Seiten 557-559, XP008035861 ISSN: 0146-9592 in der Anmeldung erwähnt -----	1,4,21
A	STOIAN R ET AL: "Laser ablation of dielectrics with temporally shaped femtosecond pulses" APPLIED PHYSICS LETTERS, AMERICAN INSTITUTE OF PHYSICS. NEW YORK, US, Bd. 80, Nr. 3, 21. Januar 2002 (2002-01-21), Seiten 353-355, XP012031308 ISSN: 0003-6951 in der Anmeldung erwähnt -----	1-3,19, 21
A	US 6 329 270 B1 (VOUTSAS TOLIS) 11. Dezember 2001 (2001-12-11) in der Anmeldung erwähnt -----	
		-/--

C.(Fortsetzung) ALS WESENTLICH ANGESEHENE UNTERLAGEN

Kategorie*	Bezeichnung der Veröffentlichung, soweit erforderlich unter Angabe der in Betracht kommenden Teile	Beitr. Anspruch Nr.
A	US 6 150 630 A (MYERS BOOTH R ET AL) 21. November 2000 (2000-11-21) in der Anmeldung erwähnt -----	
A	KORTE F ET AL: "SUB-DIFFRACTION LIMITED STRUCTURING OF SOLID TARGETS WITH FEMTOSECOND LASER PULSES" OPTICS EXPRESS, OPTICAL SOCIETY OF AMERICA, WASHINGTON, DC, US, Bd. 7, Nr. 2, 17. Juli 2000 (2000-07-17), Seiten 41-49, XP008035860 ISSN: 1094-4087 in der Anmeldung erwähnt -----	
A	US 5 569 398 A (SUN YUNLONG ET AL) 29. Oktober 1996 (1996-10-29) in der Anmeldung erwähnt -----	1,2,21
A	US 4 399 345 A (CLARK TOMMY D ET AL) 16. August 1983 (1983-08-16) in der Anmeldung erwähnt -----	
A	US 5 948 214 A (BAILEY GEOFFREY H) 7. September 1999 (1999-09-07) in der Anmeldung erwähnt -----	
A	US 4 494 226 A (HAZEL ROBERT L ET AL) 15. Januar 1985 (1985-01-15) in der Anmeldung erwähnt -----	
A	DE 100 06 081 A (HEIDELBERG INSTR MIKROTECHNIK) 23. August 2001 (2001-08-23) in der Anmeldung erwähnt -----	

Best Available Copy

INTERNATIONALES RECHERCHENBERICHT

Angaben zu Veröffentlichungen, die zur selben Patentfamilie gehören

Internationales Aktenzeichen

PCT/EP2004/008090

Im Recherchenbericht angeführtes Patentdokument		Datum der Veröffentlichung	Mitglied(er) der Patentfamilie		Datum der Veröffentlichung
WO 0228305	A	11-04-2002	AT 411719 B WO 0228305 A1 AT 16672000 A AU 8942401 A DE 50101940 D1 EP 1322248 A1 US 2004102767 A1		26-04-2004 11-04-2002 15-09-2003 15-04-2002 13-05-2004 02-07-2003 27-05-2004
US 4655547	A	07-04-1987	KEINE		
US 6281471	B1	28-08-2001	DE 60009348 D1 DE 60009348 T2 EP 1244534 A1 JP 2003518440 T TW 478025 B WO 0147659 A1 US 2002125228 A1 US 6340806 B1 US 2004134896 A1 US 2004134894 A1 US 2004188399 A1 US 2002023901 A1		29-04-2004 19-08-2004 02-10-2002 10-06-2003 01-03-2002 05-07-2001 12-09-2002 22-01-2002 15-07-2004 15-07-2004 30-09-2004 28-02-2002
DE 10203198	A	31-07-2003	DE 10203198 A1		31-07-2003
US 6329270	B1	11-12-2001	US 5959314 A US 5827773 A JP 2000232065 A JP 2000068203 A US 6169013 B1 JP 3558200 B2 JP 10291897 A		28-09-1999 27-10-1998 22-08-2000 03-03-2000 02-01-2001 25-08-2004 04-11-1998
US 6150630	A	21-11-2000	US 6621040 B1 US 5720894 A AU 7499398 A EP 1011911 A1 JP 2002511801 T WO 9967048 A1 US 6303901 B1 US 2002001321 A1 AU 1823397 A CA 2215060 A1 EP 0821570 A1 JP 11504843 T WO 9726830 A1		16-09-2003 24-02-1998 10-01-2000 28-06-2000 16-04-2002 29-12-1999 16-10-2001 03-01-2002 20-08-1997 31-07-1997 04-02-1998 11-05-1999 31-07-1997
US 5569398	A	29-10-1996	US 5265114 A DE 69507713 D1 DE 69507713 T2 EP 0793557 A1 JP 3423000 B2 JP 2001520583 T WO 9615870 A1 US 5685995 A US 5808272 A GB 2283859 A ,B JP 2625261 B2		23-11-1993 18-03-1999 02-09-1999 10-09-1997 07-07-2003 30-10-2001 30-05-1996 11-11-1997 15-09-1998 17-05-1995 02-07-1997

INTERNATIONALES RECHERCHENBERICHT I

Angaben zu Veröffentlichungen, die zur selben Patentfamilie gehören

Internationales Aktenzeichen

PCT/EP2004/008090

Im Recherchenbericht angeführtes Patentdokument	Datum der Veröffentlichung		Mitglied(er) der Patentfamilie		Datum der Veröffentlichung
US 5569398	A		JP 7506221 T KR 231811 B1 SG 81853 A1 WO 9406182 A1 US 5473624 A		06-07-1995 01-12-1999 24-07-2001 17-03-1994 05-12-1995
US 4399345	A	16-08-1983	GB 2103884 A , B IE 53635 B1 JP 58000118 A		23-02-1983 04-01-1989 05-01-1983
US 5948214	A	07-09-1999	DE 69607598 D1 DE 69607598 T2 EP 0806982 A1 WO 9623578 A1 JP 10513108 T ZA 9600715 A		11-05-2000 04-01-2001 19-11-1997 08-08-1996 15-12-1998 19-08-1996
US 4494226	A	15-01-1985	EP 0077642 A2 JP 58501745 T WO 8301533 A1		27-04-1983 13-10-1983 28-04-1983
DE 10006081	A	23-08-2001	DE 10006081 A1		23-08-2001